



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑩ DE 41 14 786 A 1

⑤1 Int. Cl. 5:
G 01 P 13/00
G 01 J 9/02
G 01 N 21/45

②1 Aktenzeichen: P 41 14 786 3
②2 Anmeldetag: 6. 5. 91
④3 Offenlegungstag: 12. 11. 92

DE 41 14 786 A 1

⑦1 Anmelder:

Zimmer GmbH Berührungsfreies Messen, 6101
Roßdorf, DE

Vertreter:

Weber, O., Dipl.-Phys.; Heim, H., Dipl.-Ing.
Dipl.-Wirtsch.-Ing., Pat.-Anwälte, 8000 München

⑦2 Erfinder:

Wipfler, Thomas, Dipl.-Phys., 6101 Roßdorf, DE;
Seidenstücker, Dieter, Dipl.-Ing., 6101 Bickenbach,
DE

⑤4 Interferometer zum Bestimmen des Betrags und der Richtung einer Meßgutbewegung

- ⑤7 Es wird ein Interferometer-Meßaufbau zur Erkennung der Richtung und des Betrags einer Meßgutbewegung beschrieben. Im Gegensatz zu bisherigen Interferometer-Anordnungen zur Richtungserkennung und Betragserkennung der Meßgutbewegung erfordert der erfindungsgemäße Meßaufbau keine teuren aktiven optischen Bauelemente. Vielmehr basiert der erfindungsgemäße Meßaufbau auf einem herkömmlichen, einen linear polarisierten Lichtstrahl erzeugenden Laser. Der aus diesem Laserstrahl abgeleitete Referenzlichtstrahl wird vor einer Überlagerung mit dem Meßstrahl einer definierten Phasenverschiebung um 90 Grad unterworfen, und es werden mittels eines polarisierenden Strahlteilers zwei Ausgangssignale erzeugt, die in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung des Meßguts eine Phasendifferenz von entweder + oder -90 Grad aufweisen. Die Bestimmung der Verschiebungslänge der Meßgutoberfläche erfolgt bei dem erfindungsgemäßen Meßaufbau entweder durch ein vorzeichenrichtiges Mitzählen der führenden Flanken der Ausgangssignale oder durch ein Zählen der Nulldurchgänge der beiden AC-gefilterten Ausgangssignale.

DE 41 14 786 A 1

Die Erfindung betrifft ein Interferometer der im Oberbegriff des Anspruchs 1 angegebenen Art.

Interferometrische Meßanordnungen dienen in erster Linie zur Erkennung der Bewegung eines Meßguts. Es sind die unterschiedlichsten Interferometer-Typen bekannt. Beispielsweise ist es bekannt, das eingangs genannte Interferometer als sogenanntes Michelson-Interferometer auszubilden. Das Funktionsprinzip eines Interferometer-Aufbaus nach Michelson ist hinlänglich bekannt. Wegen seiner Bedeutung mit Bezug auf das erfindungsgemäße Interferometer soll das Prinzip des Michelson-Interferometers nachfolgend kurz dargestellt werden.

Beim Michelson-Interferometer wird ein Laserstrahl von einem Strahlteiler in zwei Teilstrahlen zerlegt, wobei einer der beiden Teilstrahlen mit einer Optik auf das Meßgut fokussiert wird. Dieser Teilstrahl, der Meßstrahl, wird vom Meßgut reflektiert und mit dem anderen Teilstrahl dem Referenzstrahl, zur Überlagerung gebracht. Die Überlagerung oder Interferenz findet im selben Strahlteiler statt, der auch zur Erzeugung der beiden Teilstrahlen dient. Je nach Unterschied in den optischen Bewegungslängen und damit in der Phasendifferenz schwächen sich die Teilstrahlen aufgrund der Interferenz gegenseitig ab oder verstärken einander. Die überlagerten Teilstrahlen weisen deshalb eine meßortabhängige Intensitätsmodulation auf. Der Abstand der Maxima und Minima im Überlagerungssignal entspricht einer Verschiebung des Meßborts um die halbe Wellenlänge der verwendeten Laserstrahlung.

Nachteilig am Interferometeraufbau nach Michelson ist es, daß eine Bestimmung der Phasendifferenz und damit der Wegdifferenz aus der Intensität der überlagerten Teilstrahlen nur in einem Intervall möglich ist, in welchem die Intensität eine monoton steigende oder monoton fallende Funktion des Ortes ist. Mit anderen Worten ist eine Messung bei diesem Interferometer nur in einem Intervall von einer Viertel Wellenlänge eindeutig. Nur in diesem Wellenlängenintervall ist also beim Michelson-Interferometer eine Bestimmung des Betrags der Meßgutbewegung möglich. Aufgrund der Symmetrie des der Auswertung zugrundeliegenden Intensitätssignals ist jedoch die Richtung der Meßgutbewegung parallel zur z-Achse (Ausbreitungsrichtung des Meßlichtstrahls) unbestimmt. Das Michelson-Interferometer eignet sich also ausschließlich zur Bestimmung des Betrags der Meßgutbewegung.

Es sind jedoch auch Interferometer-Anordnungen bekanntgeworden, die sich neben der Bestimmung des Betrags der Meßgutbewegung auch zur Bestimmung der Meßgutbewegung eignen. Ein gängiges Verfahren zur Richtungserkennung der Meßgutbewegung ist das sogenannte Heterodyn-Verfahren.

Beim Heterodyn-Verfahren oder -Meßaufbau enthält der verwendete Laserstrahl zwei senkrecht zueinander polarisierte Komponenten, deren Frequenzen sich typischerweise um einige zehn MHz unterscheiden. In einem nicht polarisierenden Strahlteiler wird dieser Laserstrahl in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Der eine Teilstrahl wird durch ein auf 45 Grad eingestelltes Polarisationsfilter geleitet, wodurch die beiden Polarisationskomponenten des Laserstrahls miteinander interferieren. Die resultierende Strahlung ist zeitlich mit einer Schwebungsfrequenz moduliert, die der Differenz der Frequenzen der beiden senkrecht zueinander polarisierten Laserstrahlkomponenten entspricht.

Der andere Teilstrahl wird in einem polarisierenden Strahlteiler in seine beiden Polarisationskomponenten aufgespalten. Die eine dieser Komponenten wird als Meßstrahl, die andere als Referenzstrahl verwendet, und die beiden reflektierten Komponenten werden mittels der Strahlteiler wieder vereinigt und mittels eines weiteren Polarisationsfilters zur Interferenz gebracht. Die resultierende Strahlung ist mit derselben Schwebungsfrequenz moduliert, wie die mit dem zuerst genannten Polarisationsfilter erzeugte Strahlung.

Weglängenänderungen zwischen Referenzstrahl und Meßstrahl verursachen Phasenänderungen in der Schwebungsfrequenz. Die Phasendifferenz zwischen der Schwebung des ersten Teilstrahls und der Schwebung des zweiten Teilstrahls ist eine monoton wachsende Funktion der Verschiebung des Meßguts mit einer Periodizität der halben Wellenlänge ($\lambda/2$). Auf diese Weise ist die Richtung der Meßgutverschiebung in jedem beliebigen Bereich von $\lambda/2$ eindeutig bestimmt und durch das Mitzählen der vollständigen Phasenumläufe von 2π sind auch größere Wellenlängenänderungen als $\lambda/2$ (siehe Michelson-Interferometer) meßbar.

Der Nachteil des Heterodyn-Meßaufbaus liegt in dem beträchtlich hohen Aufwand, der getrieben werden muß, um zwei Polarisationsrichtungen mit definiert unterschiedlicher Frequenz zu erzeugen. Zu diesem Zweck werden in der Regel entweder Gaslaser mit Zeemann-Effekt oder akustooptische Modulatoren verwendet. Außerdem vergrößern die beiden Polarisatoren die Anzahl der notwendigen optischen Komponenten.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, einen Interferometer-Aufbau anzugeben, der ausgehend von dem eingangs genannten Interferometer bei einfachem Aufbau, einfacher Justage und geringem Aufwand an optischen Bauteilen eine Betrags- und Richtungserkennung der Meßgutbewegung erlaubt.

Gelöst wird diese Aufgabe durch die kennzeichnenden Merkmale des Anspruchs 1. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Der erfindungsgemäße Interferometer-Aufbau basiert also auf einem kohärenten Lichtstrahl mit zwei senkrecht zueinander polarisierten, frequenz- und phasengleichen Komponenten, wobei der von diesem Lichtstrahl abgezwigte Referenzlichtstrahl vor einer Überlagerung mit dem Meßlichtstrahl einer 90-Grad-Phasenverschiebung unterworfen wird, welche die Ableitung zweier Ausgangssignale aus den Mischkomponenten des Referenzlichtstrahls und des Meßlichtstrahls derart erlaubt, daß die Richtung der Phasenverschiebung der beiden Ausgangssignale eine eindeutige Aussage mit Bezug auf die Meßgut-Bewegungsrichtung erlaubt. Je nach Bewegungsrichtung der Meßgutoberfläche eilt also entweder das eine oder das andere Ausgangssignal dem jeweils anderen Ausgangssignal um 90 Grad voraus.

Vorteilhafterweise erfolgt demnach die Richtungserkennung mittels des erfindungsgemäßen Meßaufbaus durch eine Detektion der führenden Flanken der beiden Ausgangssignale oder alternativ hierzu durch eine Detektion der Nulldurchgänge der AC-gefilterten Ausgangssignale. Darüber hinaus erlaubt der erfindungsgemäße Meßaufbau eine einfache und präzise Bestimmung auch größerer Weglängenänderungen als $\lambda/4$, nämlich entweder durch ein vorzeichenrichtiges Mitzählen der führenden Ausgangssignalfanken oder durch ein Zählen der jeweiligen Nulldurchgänge.

Der erfindungsgemäße Meßaufbau ist also durch einen einfachen Aufbau gekennzeichnet, der ausgehend vom herkömmlichen Michelson-Meßaufbau lediglich zusätzlich eine Verzögerungseinrichtung, vorteilhafterweise eine $\lambda/8$ -Verzögerungsplatte und einen polarisierenden Strahlteiler umfaßt. Diese zusätzlichen Komponenten sind verschleißfrei. Außerdem arbeitet der erfindungsgemäße Meßaufbau ohne teure aktive optische Bauelemente, wie beispielsweise Zeemann-Laser oder akustooptische Modulatoren, wie sie beim Heterodyn-Meßaufbau oder beim Meßaufbau unter Verwendung einer Bragg-Zelle unerlässlich sind. Außerdem ist der erfindungsgemäße Meßaufbau äußerst kompakt und erfordert keinen größeren Justageaufwand. Da schließlich die beiden Ausgangssignale exakt um 90 Grad phasenverschoben sind, kann die Geschwindigkeit der Meßgutbewegung mittels eines Algorithmus in einfacher Weise direkt abgeleitet werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der vollständigen Eliminierung von Oberflächeneffekten durch Verwendung eines Polarisationsfilters im Strahlengang des Meßstrahls, da nur der Referenzstrahl polarisationsoptisch codiert ist.

Die erfindungsgemäß an die kohärente Lichtquelle gestellte Anforderung (zwei senkrecht zueinander polarisierte frequenz- und phasengleiche polarisierte Komponenten) wird von herkömmlichen, einfach aufgebauten Lasern erfüllt, nämlich von jedem Laser, der in der Lage ist, einen linear polarisierten Laserstrahl zu erzeugen. Solche Laser stehen kostengünstig zur Verfügung.

Nachfolgend soll die Erfindung anhand der Zeichnung näher erläutert werden; in dieser zeigt

Fig. 1 eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Interferometer-Aufbaus ausgehend von einem herkömmlichen Michelson-Interferometer und

Fig. 2 den Intensitätsverlauf der beiden Ausgangssignale des Interferometers von **Fig. 1** in Abhängigkeit der z-Koordinate der Meßgutoberflächen-Bewegung.

Interferometrische Messungen von Bewegungen einer Meßgutoberfläche erfolgen jeweils in einer festgelegten Richtung, die im allgemeinen z-Achse genannt wird. Diese z-Achse verläuft parallel zur Verbindungslinie zwischen dem Meßgerät und der Meßgutoberfläche, also parallel zur Ausbreitungsrichtung des Meßlichtstrahls zwischen dem Meßgerät und dem Meßgut.

Der in **Fig. 1** schematisch dargestellte Meßaufbau dient der Richtungs- und Betragserkennung einer Meßgutbewegung in Richtung der z-Achse. Insbesondere handelt es sich bei dem in **Fig. 1** gezeigten Meßaufbau um ein modifiziertes Michelson-Interferometer, dessen Funktionsweise bereits eingangs näher beschrieben worden ist.

Die kohärente Lichtquelle 1 bei dem in **Fig. 1** gezeigten Meßaufbau ist ein Laser, der einen Laserstrahl mit zwei senkrecht zueinander polarisierten Komponenten identischer Frequenz und identischer Phase emittiert. Diese Bedingung wird von jedem linear polarisierten Lichtstrahl erfüllt, da Licht Vektoreigenschaften besitzt. Die senkrecht polarisierten Strahlungskomponenten sind in der **Fig. 1** durchgehend mit einem doppelseitigen Pfeil symbolisiert, während die gleichzeitig von dem Laser 1 erzeugte horizontal polarisierte Strahlungskomponente durch einen ausgefüllten Kreis symbolisiert ist.

Der Laserstrahl wird in einem nicht polarisierenden Strahlteiler 2 an sich bekannten Aufbau in zwei Teilstrahlen aufgespalten. Der eine Teilstrahl dient als Meßstrahl und wird mittels einer Optik 3 auf eine Meßgutoberfläche 4 fokussiert. Das von der Meßgutoberfläche 4 reflektierte Licht wird mittels derselben Optik 3 in den

Strahlteiler 2 zurückprojiziert.

Der andere Teilstrahl, der als Referenzstrahl dient, wird durch eine Verzögerungsplatte 5 hindurch auf einen Reflektor 6 projiziert. Der dargestellte Meßaufbau erlaubt in vorteilhafter Weise die Auslegung des Reflektors 6 als einfachen Spiegel. Der vom Reflektor 6 reflektierte Lichtstrahl durchquert erneut die Verzögerungsplatte 5, bevor er im nicht polarisierenden Strahlteiler 2 mit dem reflektierten Meßstrahl überlagert wird.

Die Verzögerungsplatte 5 zeichnet sich dadurch aus, daß sie bei Licht gleicher Frequenz unterschiedliche Brechzahlen für unterschiedliche Polarisationsrichtungen besitzt. Dadurch erfahren die beiden senkrecht zueinander polarisierten Komponenten des Referenzstrahls eine Phasenverschiebung. Die in der dargestellten Meßanordnung verwendete $\lambda/8$ -Verzögerungsplatte erzeugt bei einmaligem Durchgang eine Phasenverschiebung von 45 Grad. Durch den zweimaligen Durchgang werden die beiden senkrecht zueinander polarisierten Komponenten des Referenzstrahls um 90 Grad phasenverschoben.

Die im nicht polarisierten Strahlteiler 2 überlagerten oder zur Interferenz gebrachten Teilstrahlen treffen auf einen nachgeschalteten polarisierenden Strahlteiler 7. Dieser trennt die beiden phasenverschobenen senkrecht zueinander polarisierten Komponenten des Referenzstrahls und der Meßstrahl wird in zwei senkrecht zueinander polarisierte phasengleiche Komponenten zerlegt. Sowohl die Interferenz der horizontal polarisierten Komponenten von Meßstrahl und Referenzstrahl wie auch die Interferenz der vertikal polarisierten Komponenten ergeben je ein intensitätsmoduliertes Ausgangssignal A1 bzw. A2. Die beiden Ausgangssignale A1, A2 sind zueinander um 90 Grad phasenverschoben (**Fig. 2**).

Je nach Bewegungsrichtung der Meßgutoberfläche eilt entweder das eine oder das andere Ausgangssignal A1 bzw. A2 dem jeweils anderen Ausgangssignal um 90 Grad voraus und erlaubt daher in einfacher Weise eine Richtungserkennung. Die Richtungserkennung erfolgt beispielsweise durch eine Detektion der führenden Flanken der Ausgangssignale, oder alternativ hierzu durch eine Detektion der Nulldurchgänge der AC-gefilterten Ausgangssignale A1, A2.

Darüber hinaus erlaubt der in **Fig. 1** dargestellte Meßaufbau auch die Ermittlung einer größeren Weglängenänderung als $\lambda/4$ (s. Michelson-Interferometer der herkömmlichen Art). Hierzu ist es lediglich notwendig, die führenden Flanken vorzeichenrichtig oder die Nulldurchgänge zu zählen.

Bei Versuchen mit dem vorstehend näher beschriebenen Meßaufbau wurde festgestellt, daß Messungen der z-Koordinate der Meßgutoberflächenbewegung innerhalb eines Meßbereichs größer als 1 mm mit einer Auflösung kleiner als 0,2 mm möglich sind.

Patentansprüche

1. Interferometer mit einer kohärenten Lichtquelle, mit einem nicht polarisierenden Strahlteiler zur Erzeugung eines Referenzlichtstrahls und eines auf ein Meßgut fokussierbaren Meßlichtstrahls aus dem Lichtstrahl der Lichtquelle, wobei der vom Meßgut reflektierte Meßlichtstrahl mit dem Referenzlichtstrahl zur Überlagerung gebracht wird, und mit einer Auswerteinrichtung zum Bestimmen der Meßgutbewegung parallel zur Ausbreitungsrichtung des Meßlichtstrahls zwischen Strahlteiler und Meßgut (z-Achse) aus dem Intensitäts-

verlauf des durch Überlagerung gewonnenen Lichtstrahls, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Lichtstrahl der kohärenten Lichtquelle (1) zwei senkrecht zueinander polarisierte Komponenten gleicher Frequenz und gleicher Phase enthält, 5
daß eine Laufzeitverzögerungseinrichtung (5) vorgesehen ist, die von dem Referenzlichtstrahl durchsetzt ist, bevor dieser zur Überlagerung mit dem Meßlichtstrahl gelangt, und die eine 90-Grad-Phasenverschiebung der beiden senkrecht zueinander polarisierten Komponenten des Referenzlichtstrahls erzeugt, 10
daß ein polarisierender Strahlteiler (7) vorgesehen ist, der von dem mit dem Referenzlichtstrahl überlagerten Meßlichtstrahl durchsetzt und so ausgelegt ist, daß die beiden phasenverschobenen Referenz Strahlkomponenten und die beiden senkrecht zueinander polarisierten, phasengleichen Meßstrahlkomponenten jeweils voneinander getrennt, miteinander zur Interferenz gebracht werden und 15
ein Ausgangssignal (A1) bilden, das mit Bezug auf ein weiteres, durch Interferenz horizontal polarisierter Referenz- und Meßlichtstrahlkomponenten gebildetes Ausgangssignal (A2) in Abhängigkeit der Meßgut-Bewegungsrichtung um entweder + 25
90 oder - 90 Grad phasenverschoben ist.

2. Interferometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerteeinrichtung die Meßgut-Bewegungseinrichtung anhand der führenden Flanken der beiden Ausgangssignale (A1, 30
A2) bestimmt.

3. Interferometer nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerte-Einrichtung Weglängenänderungen des bewegten Meßguts durch ein vorzeichenrichtiges Mitzählen der führenden 35
Ausgangssignalfanken bestimmt.

4. Interferometer nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerte-Einrichtung die Meßgut-Bewegungsrichtung anhand der Nulldurchgänge der beiden AC-gefilterten Ausgangssignale (A1, A2) bestimmt. 40

5. Interferometer nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Auswerte-Einrichtung Weglängenänderungen des bewegten Meßguts durch ein Mitzählen der Nulldurchgänge der AC-gefilterten Ausgangssignale (A1, A2) bestimmt. 45

6. Interferometer nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die kohärente Lichtquelle (1) ein Laser ist.

7. Interferometer nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Laser (1) einen linear polarisierten Lichtstrahl erzeugt. 50

8. Interferometer nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Laufzeitverzögerungseinrichtung (5) eine $\lambda/8$ -Verzögerungsplatte und einen Reflektor (6) umfaßt, der so angeordnet ist, daß der Referenzlichtstrahl die $\lambda/8$ -Verzögerungsplatte (5) zweimal durchsetzt. 55

9. Interferometer nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Reflektor (6) ein Spiegel ist. 60

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig. 1

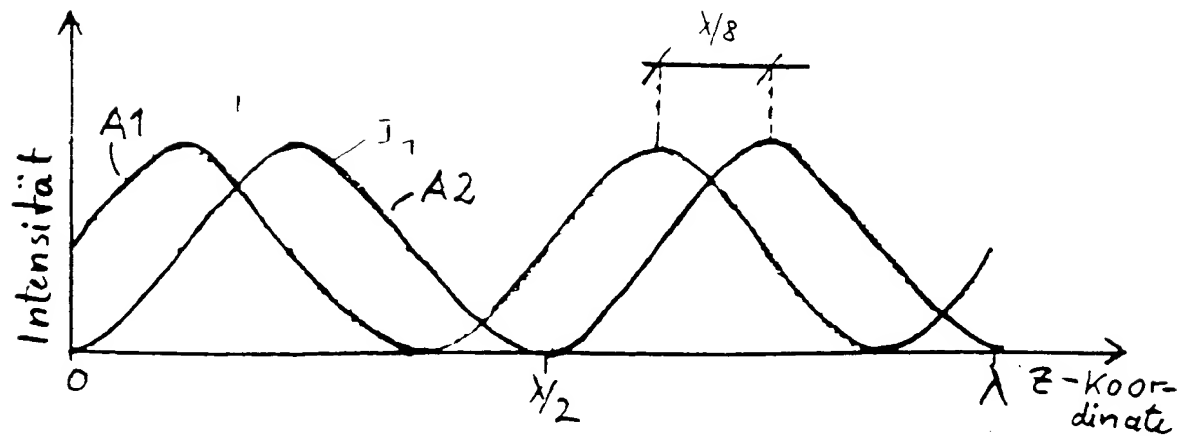
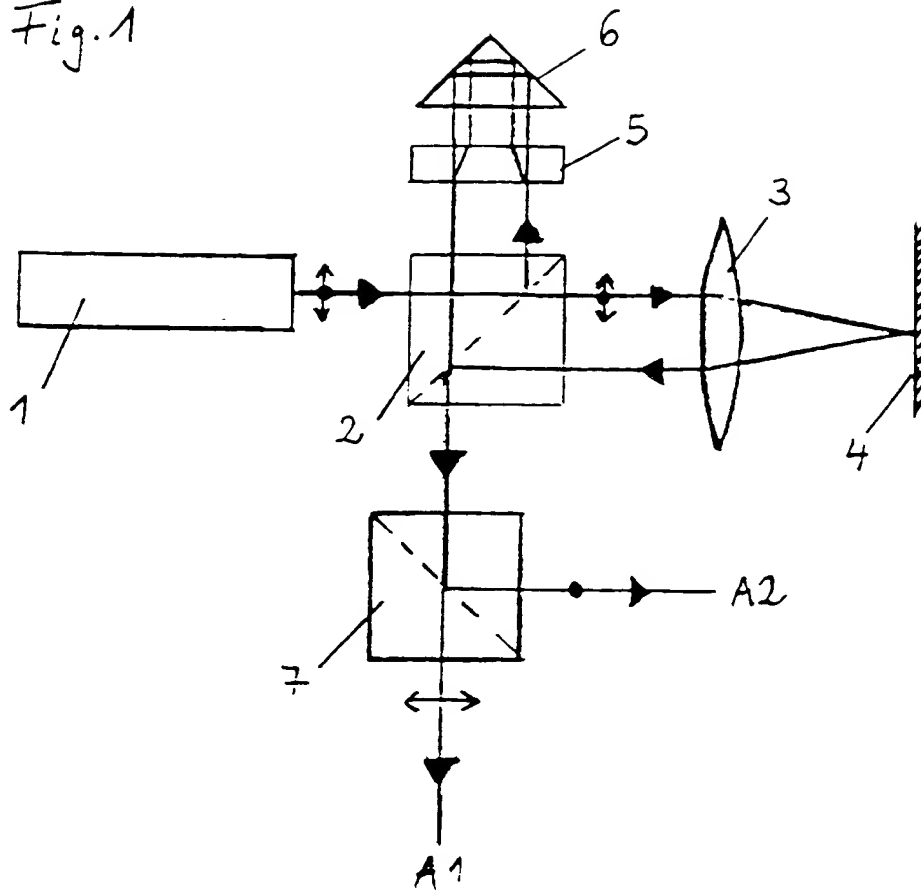


Fig. 2